

ANALISIS DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE LA UNION
TUBO-PLACA TUBULAR ANTE UN PROCESO DE EXPANSION
HIDRAULICA

Héctor Claudio Sanzi

Grupo de Investigación de Ingeniería Estructural
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo
París 532 - 1706 Haedo, Buenos Aires, Argentina

RESUMEN

En el presente trabajo, se presentan los resultados obtenidos del estado tensional que ocurren en la unión tubo-placatubo de un intercambiador de calor ante el proceso de expansión hidráulica. Durante este proceso una cantidad importante de tubos se encontraron fisurados.

Un cálculo elasto-plástico mediante el método de elementos finitos fue llevado a cabo para determinar las deformaciones en dicha unión.

Se realizó un análisis de carga límite para distintos tamaños de fisuras.

Las más importantes conclusiones son presentadas y comparadas con resultados analíticos.

ABSTRACT

In the present work, its presenting the stresses and displacement occurred in the tube-tubesheet joint of a heat exchanger under hydraulic expansion process. During this process a great amount of tubes cracked.

An elasto-plastic finite element calculation was carried out in order to determine the exact deformations of the tube-tubesheet joint.

The limite load was analyzed for diferent size of the cracked. The most important conclusions are presented and compared with the obtained by analytical procedures.

INTRODUCCION

El objeto del presente informe es el de estudiar el estado tensional y los desplazamientos que se producen en la placa tubular y en los tubos que son anclados por procedimiento de expansión hidráulica.

El alcance de este trabajo es la de realizar un cálculo elasto-plástico en la zona tubo-placatubo, teniendo en cuenta el comportamiento de ambos materiales y el problema de contacto.

Se han utilizado dos métodos de cálculo: uno analítico simplificado y el segundo mediante el método de elementos finitos.

Para finalizar se efectuó un análisis de carga límite del tubo bajo presión de expansión con diferentes tamaño de fisuras, ya que durante el proceso una cantidad importante de tubos se fisuraron antes de entrar en contacto con la placa tubular.

DATOS DEL TUBO Y DE LA PLACA TUBULAR

En la figura 1 se muestra la geometría de detalle del componente y de la unión. Se tuvieron en cuenta las dimensiones nominales.

Tubos: (con costura) X1CrNiMoNb 1.4575

Diámetro exterior [mm]	:	23.0
Espesor del tubo [mm]	:	1.1
Tensión de fluencia σ_{ft} [MPa]	:	633
Tensión de rotura σ_{rt} [MPa]	:	776

Placa tubular: 15 MnNi63 (1.6210)

Diámetro de la placa tubular [mm]	:	1230
Espesor de la placa [mm]	:	330
Longitud a expandir [mm]	:	300
Arreglo triangular, paso [mm]	:	25.11
Diámetro del agujero [mm]	:	23.35
Huelgo radial/diametral entre tubo-agujero [mm]	:	0.175/0.350
Tensión de fluencia σ_{fp} [MPa]	:	385
Tensión de rotura σ_{rp} [MPa]	:	559

Para ambos materiales

Módulo de elasticidad [MPa]	:	210000
Coefficiente de Poisson	:	0.3

En las figuras 2 y 3 se muestran los diagramas tensión-deformación de ambos materiales.

ESTADO DE CARGA

De acuerdo a los datos del proceso de la expansión hidráulica la presión máxima es de 3000 bar. El camino de carga y descarga lineal se presenta en el tiempo en que transcurre el proceso total de aproximadamente 6 segundos, alcanzando su máximo valor a los 3 segundos, figura 4.

PROCESO DE EXPANSIONADO HIDRAULICO

El proceso se caracteriza por un tratamiento cuidadoso del material a expandir bajo ciertas condiciones de presión, que permiten la adherencia en el final del mismo. La presión de adherencia es la tensión radial en la zona de contacto entre tubo y placa, que debe asegurar la unión ante todas las variaciones de presión y temperatura que se presenten durante la vida útil del equipo. La presión de adherencia es la presión residual entre tubo y la placa, que permanece debido a la gran recuperación elástica de la placa, luego de retirada la presión de expansión.

METODO ANALITICO SIMPLIFICADO

Se ha utilizado un método analítico simplificado, basado en la hipótesis de un tubo rodeado por otros ficticios, figura 5, para estimar las presiones que actuarían en el proceso. Se resolverá una simple solución analítica simplificada basada en la teoría de tubos gruesos [1]. Para ello, se simplifica la geometría de la placa tubular por un tubo grueso cuyos radios interior y exterior se muestran en la figura 5. Se utiliza el criterio de fluencia de Tresca como límite tensional. Se define presión límite P_0 , como la presión de expansión del líquido con la cual, una vez retirada, la recuperación elástica de la placa es igual a la del tubo. En este caso no hay adhesión entre ambos.

$$P_0 = \sigma_{\epsilon_t} \frac{2(U_p^2 - 1)}{\sqrt{3}U_R^2 + 1 [U_p^2(1 + \mu) + (1 - \mu)]} + \frac{U_R^2 - 1}{2} \sigma_{\epsilon_t} \quad (1)$$

Por otro lado y por definición denominamos P_i a la presión máxima para que la placa no entre en fluencia.

$$P_i < \sigma_{\epsilon_p} \frac{(U_p^2 - 1)}{(U_p^2 + 1)} + \sigma_{\epsilon} \frac{(U_R^2 - 1)}{2} \quad (2)$$

Del análisis debe surgir que la $P_i > P_0$, caso contrario habría plastificación entre los agujeros de la placa tubular. La presión de adhesión P_h , se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$\frac{P_h}{P_i - P_0} = \frac{1}{1 + \frac{(U_p^2 - 1) U_R^2 (1 - \mu) + 1 + \mu}{(U_R^2 - 1) U_p^2 (1 + \mu) + 1 - \mu}} \quad (3)$$

A partir de (1), (2) y (3), reemplazando nos queda:

$$\begin{aligned} P_i &= 1534 \text{ bar} \\ P_0 &= 1798 \text{ bar} \\ P_h &= 62 \text{ bar} \end{aligned}$$

Como el P_i calculado es menor que el valor de P_0 , la placa tubular se plastificará entre agujeros. Se aconseja según referencia [1], como consecuencia de los resultados obtenidos, para evitar la plastificación de la placa el cambio del material por otro de tensión de fluencia superior, de manera que la misma se recupere en el período elástico o en su defecto, rever los materiales seleccionados. Otra alternativa sería disminuir la presión de expansión del proceso, lo cual será análisis de otro trabajo. De mantener los materiales del tubo y la placa y la presión de expansionado, se deberá verificar la unión mediante un estudio elastoplástico más detallado.

METODO DE ELEMENTOS FINITOS

Como consecuencia de los resultados obtenidos, y que el cálculo analítico es conservativo, ya que no es capaz de representar las diferentes rigideces que ofrece la placa en las distintas direcciones debido a la presencia de los agujeros, se ha realizado un análisis más detallado mediante el método de elementos finitos de una porción de la placa. Para el cálculo se utilizó el programa NISA [2] y en el mismo se puso de manifiesto:

- * La ubicación relativa del agujero frente a las demás perforaciones de la placa tubular.
- * El tubo en su posición inicial antes de entrar en contacto.
- * El huelgo inicial adoptado entre tubo y agujero es de .175 mm.

El modelo de elementos finitos se presenta en la figura 6. Se seleccionaron elementos estructurales rectangulares de 8 nodos, para representar la placa cuyo espesor para el expansionado es de 300 mm y el tubo. Se utilizaron elementos del tipo "gap" para simular el efecto no lineal de contacto entre cara externa del tubo y cara interna del agujero de la placa. Se consideró un gap radial inicial de 0.175 mm.

Se densificó la malla en la zona de contacto entre tubo y placa. Aprovechando la simetría de revolución que presenta la estructura, se adoptan las condiciones de borde mostradas en la figura 6. Estas condiciones de borde fueron chequeadas mediante un modelo elástico lineal, en el que se consideró el comportamiento del tubo sometido a presión interior, y en el mismo se verificó el corrimiento radial comparándolo con la solución analítica extraída de Referencia [3].

El camino de carga y descarga lineal se presentó en la figura 4, su aplicación es gradual en el tiempo.

Para el comportamiento del material, se utilizaron los diagramas de tensión-deformación mostradas en las figuras 2 y 3.

RESULTADOS DEL PROCESO DE EXPANSION HIDRAULICA

En las Figuras 7, 8, 9 y 10 se observan los resultados obtenidos del análisis tensional en la dirección radial y $\theta = 0$, figura 6. En la Figura 7 se gráfica el desplazamiento radial del tubo en la zona de contacto con la placa durante el proceso del expansionado. Se observa que el desplazamiento al final del proceso es de 0.253 mm (nodo 856 del tubo), que asegura el contacto entre el tubo y la placa (huelgo en el instante inicial 0.175 mm).

La tensión radial en la zona de contacto, figura 8, alcanza un valor de -9.6 MPa o 96 bar (nodo 14 de la placa y 856 del tubo) en el final. Este valor se compara con el obtenido mediante el método analítico simplificado P_h de 62 bar. La tensión radial se utilizará, en una etapa posterior, en el cálculo de la fuerza necesaria para desanclar al tubo de la placa, "PULL-OUT".

En las figuras 9 a, b y c se muestra la tensión efectiva de la unión durante el proceso de expansión. Se observa que a 3 seg. el tubo y la placa alcanzan valores de 688 MPa (fluencia, 633 MPa) y 420 MPa (fluencia, 385 MPa) respectivamente, nodos 856 y 117 de figura 9b, y para el instante final de 6 seg., la tensión en el tubo y la placa son 135.3 MPa y 406 MPa, figura 9c.

En la Figura 10 se muestra el grado de plastificación de la placa durante el expansionado.

ANALISIS DE CARGA LIMITE

Durante el proceso de expansión una cantidad importante de tubos se fisuraron. Del análisis de la falla surge:

1. La falla se originó en la zona de la costura del tubo.
 2. La fisura se inició antes de entrar en contacto el tubo con la placa. Por otro lado, el estado tensional de compresión en la zona de contacto ayudaría a cerrar la fisura.
- De la figura 7 se puede deducir que el contacto se alcanza en el instante 0.725 segundos, correspondiente a una presión de 725 bar (desplazamiento radial distinto de cero del nodo 14).

Antes de analizar otras causas de la falla del tipo metalúrgica, se procedió a efectuar un análisis de carga límite ante la eventual presencia de una imperfección en dicha costura.

De acuerdo a las fórmulas desarrolladas por Chell [4], para tubos sometidos a presión interior, con fisuras longitudinales externas no pasantes, se efectuó un análisis parametrizado de las variables que provocan su propagación en el tubo. Chell propuso que la falla en el ligamento local de un tubo con una cierta imperfección, figura 11, esta expresada de las siguientes ecuaciones:

$$\frac{PR}{\sigma_t t} = \frac{\eta}{1 - (1 - \eta)/M(\rho, \eta)} \quad M(\rho, \eta) = [1 + 1.61\rho^2(1 - \eta)]^{1/2} \quad (4)$$

En las siguientes figuras se graficó:

- Figura 12: La tensión longitudinal membranar del tubo presente en el ligamento remanente para una determinada profundidad y semilongitud de la fisura.
- Figura 13: La relación entre la profundidad de la fisura y el espesor del tubo en función de su semilongitud, para distintos valores de presión de expansión (inferiores a la que provoca el contacto, 725 bar).

De la figura 12 se observa que los mínimos valores de profundidad y semilongitud de fisura para distintas presiones son:

Profundidad a [mm]	Semilongitud c [mm]	Presión [bar]
.894	20.250	150
.875	6.000	225
.731	9.750	300
.788	3.750	375
.656	4.500	450
.850	1.500	525
.731	1.500	600
.694	0.750	675

Tabla 1

CONCLUSION Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS

En el presente trabajo se describen los principales resultados del cálculo analítico simplificado y numérico para determinar la integridad de la unión tubo-placa tubular de un intercambiador de calor ante un proceso de expansión hidráulica. Durante el proceso de expansión una cantidad importante de tubos se fisuraron. Se efectuó un análisis de carga límite.

Resultados analíticos

De los resultados surge que para anclar del tubo en la placa, se necesita una presión de expansión de 3000 bar, lo que provoca la plastificación de la placa, lo cual no es deseado.

Resultados numéricos, el método de elementos finitos

Las más importantes conclusiones se sumarian a continuación:

1. Las tensiones de compresión en la zona de contacto, obtenidas en el instante final, son suficientes para fijar al tubo.
2. Se confirma la plastificación de la placa obtenida con el método analítico. Para evitarla se recomienda cambiar el material de la placa tubular por otro de tensión de fluencia superior.
3. Se asegura el contacto entre tubo y placa tubular.
4. La tensión efectiva del tubo alcanzada en el instante de máxima presión (3000 bar) es 688 MPa y muy cercana a su tensión de rotura, 776 MPa. Se recomienda rever los parámetros del proceso y/o la selección de los materiales.
5. En el trabajo no se han tenido en cuenta la incidencia de las tolerancias de fabricación, ya que juegan un papel importante en el análisis por el cambio en el gap inicial.

Además se efectuó un análisis de carga límite de un tubo sometido a presión interior, antes de efectuarse el contacto, con una fisura longitudinal no pasante, simulando una posible imperfección en la zona de la costura, ya que allí se detectó el inicio y la propagación de la fisura.

Los tubos fisurados fueron previamente relevados dimensionalmente y no se detectaron anomalías o imperfecciones del orden de las obtenidas mediante las expresiones desarrolladas por Chell, tabla 1.

Por lo tanto, se recomendó como última instancia analizar: el procedimiento de soldadura y tratamiento térmico en la costura, otros fenómenos metalúrgicos, la selección de los materiales y rever las variables que intervienen en el proceso de expansión.

REFERENCIAS

- [1] Balcke-Durr. Sonderdruck A31e. Hydraulic Expansion, a New Method for Anchoring of Tubes.
- [2] FINITE ELEMENT PROGRAM NISA. Version 94.0 EMRC
- [3] R.J.Roark and W.C.Young: "Formulas for Stress and Strain".
- [4] A.G.Miller: "Review of Limit Loads of Structure Containing Defects". Int.J.Pres.Ves. and Piping 32 (1988) 197-327.

Figura 1:

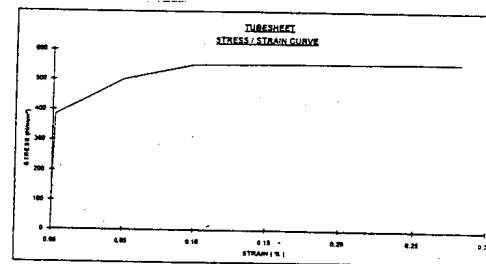
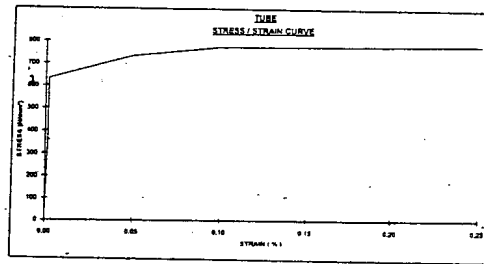
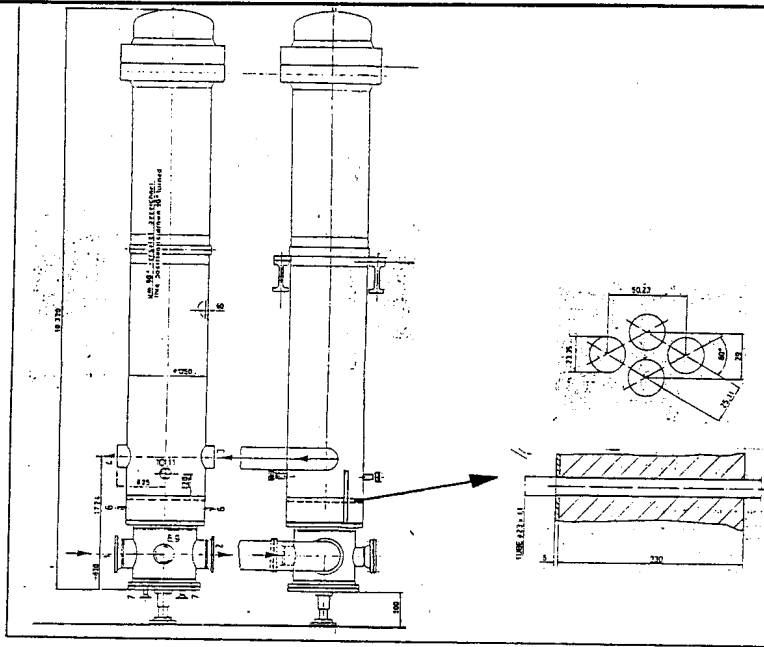
Geometría del
Componente

Figura 2 y 3: Diagramas Tensión-Deformación

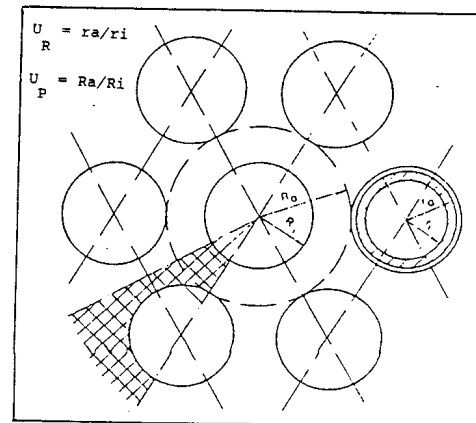
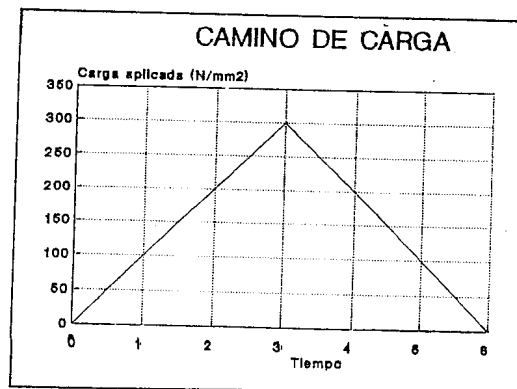


Figura 4: Diagrama de carga

Figura 5: Modelo Analítico

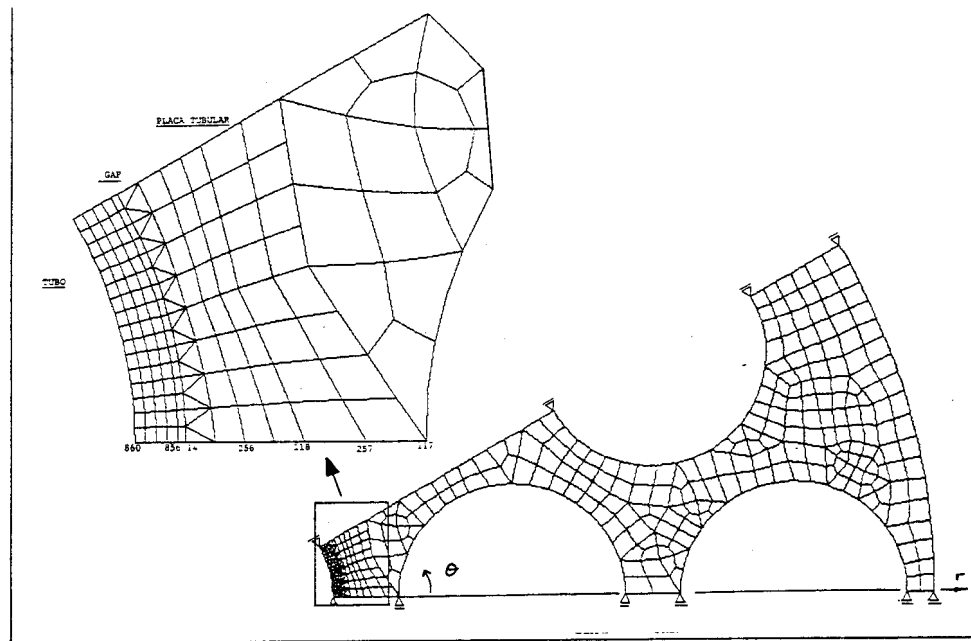
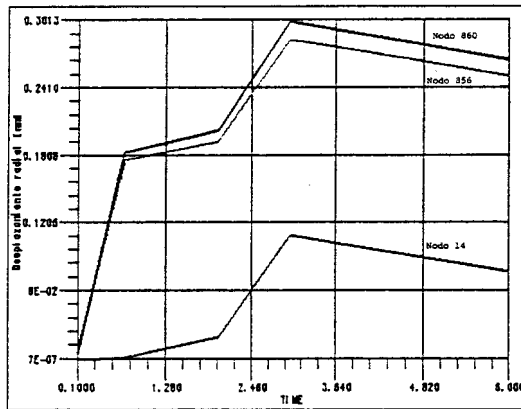
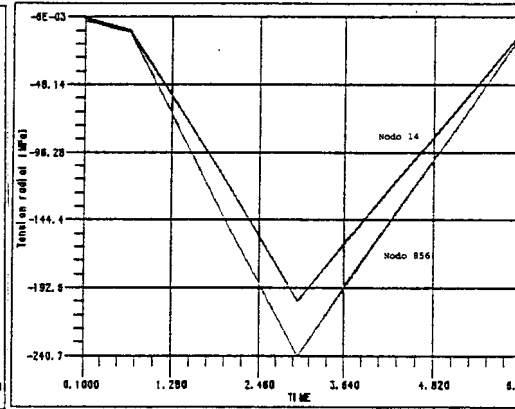


Figura 6: Modelo de Elementos Finitos



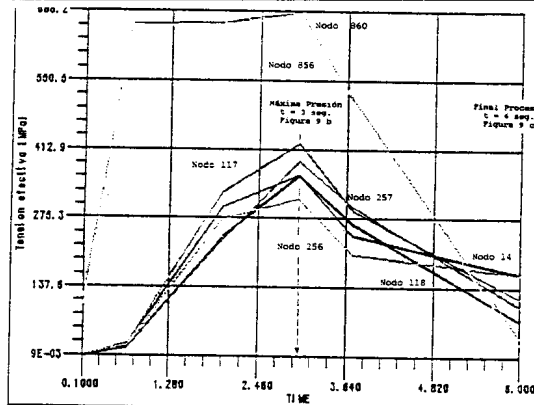
Desplazamiento radial del tubo en la zona de contacto con la placa
UNION TUBO-PLACA TUBULAR - EXPANSIONADO HIDRAULICO P= 3000 BAR



Tension radial en la zona de contacto en función del tiempo
UNION TUBO-PLACA TUBULAR - EXPANSIONADO HIDRAULICO P= 3000 BAR

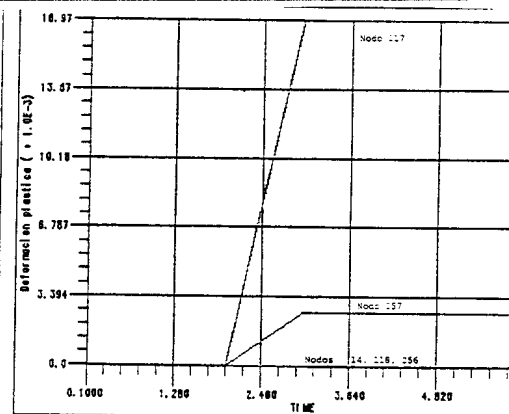
Figura 7

Figura 8



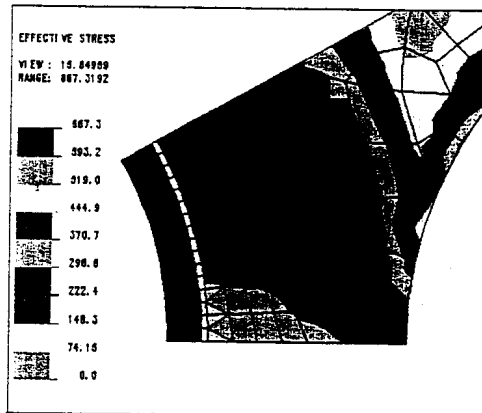
Tensión efectiva del tubo-placa tubular en función del tiempo
UNI ON TUBO-PLACA TUBULAR - EXPANSIONADO HIDRAULICO P= 3000 BAR

Figura 9a



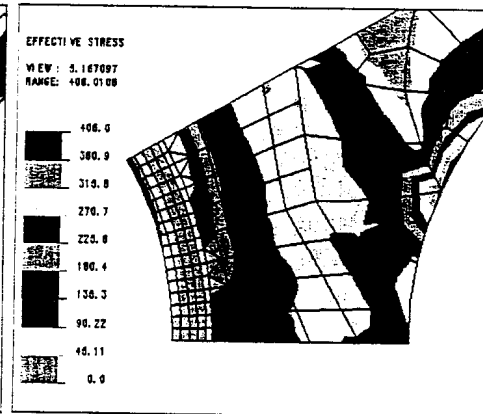
Deformación plástica de la placa tubular en función del tiempo
UNI ON TUBO-PLACA TUBULAR - EXPANSIONADO HIDRAULICO P= 3000 BAR

Figura 10



Tensión efectiva (MPa) en el instante de máxima presión 3 seg.
UNI ON TUBO-PLACA TUBULAR - EXPANSIONADO HIDRAULICO P= 3000 BAR

Figura 9b



Tensión efectiva (MPa) en el instante final del proceso 6 seg.
UNI ON TUBO-PLACA TUBULAR - EXPANSIONADO HIDRAULICO P= 3000 BAR

Figura 9c

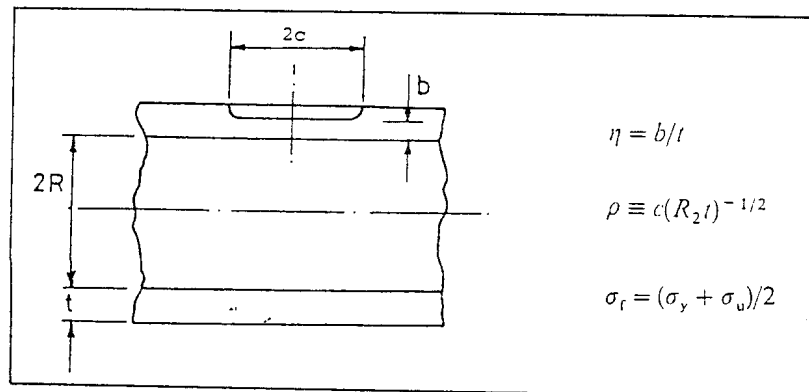


Figura 11:
Modelo de cálculo usado para el análisis de carga límite

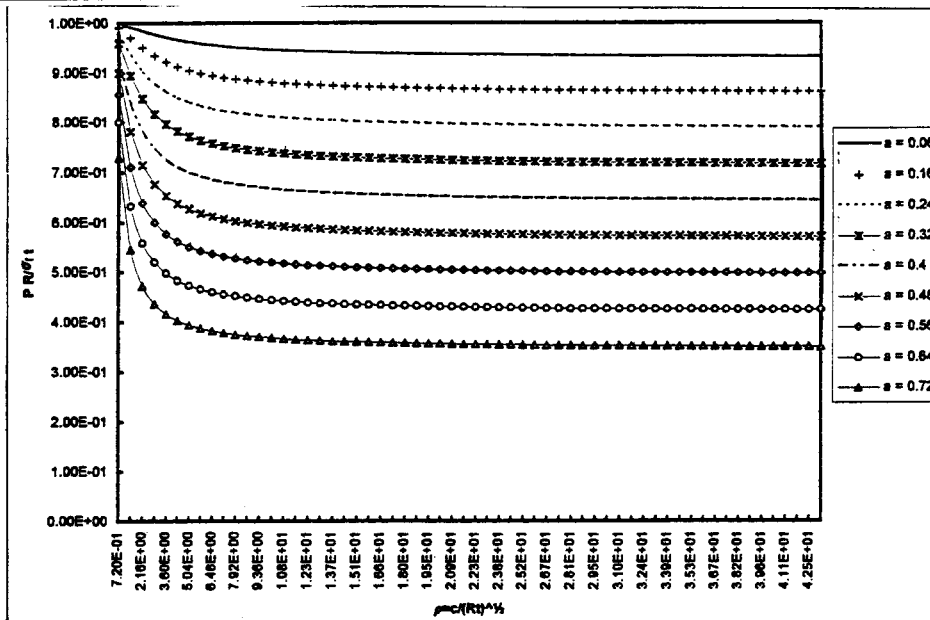


Figura 12:
Tensión Longitudinal Membranal del tubo en el ligamento remanente, para una dada profundidad y semilongitud de fisura.

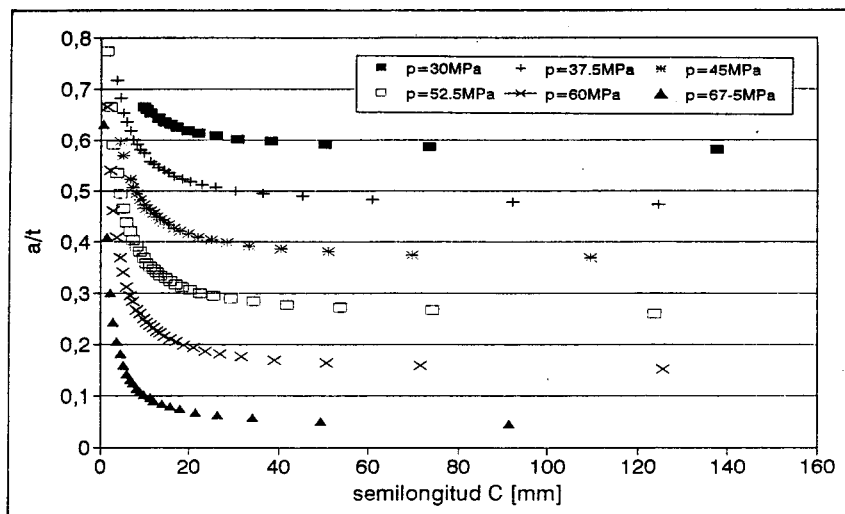


Figura 13:
Relación entre la profundidad de la fisura y el espesor del tubo en función de su semilongitud, para diferentes valores de presión de expansión (inferiores a la que provoca el contacto, 725 bar).